

77 GHz 帯近距離パッシブイメージング用小型レンズアンテナの特性

滝本 未来[†] 中田 淳^{††} 山田 康太^{†††} 佐藤 弘康[†] 澤谷 邦男[†]

[†] 東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻 〒980 8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6 6 05

^{††} 中央電子株式会社 〒192-8532 東京都八王子市元本郷町 1 丁目 9 番 9 号

^{†††} マスプロ電工株式会社 〒470-0194 愛知県日進市浅田町上納 80 番地

E-mail: takimoto, sahiro@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 77GHz 帯小型パッシブイメージング装置の開発を目的として、口径が 100 mm の小型レンズを作製し、受信素子の指向性を変化したときのレンズアンテナの基本特性を実験的に検討している。レンズの像面に配置する受信素子として、対せき形フェルミアンテナ (Antipodal Fermi antenna: APFA) および開口端導波管アンテナ (Open-ended Waveguide Antenna: OWG) を使用し、各受信素子を像面に配置したときのレンズアンテナの遠方界および光軸上の受信電圧分布を実験的に求めた。その結果、OWG を送信アンテナとして距離 610 mm に配置したときのレンズ像面における受信電圧は、APFA を受信素子とした場合が OWG の場合より 8.5 dB 高い結果が得られ、近距離イメージングにおける指向性アンテナの優位性が確認された。

キーワード パッシブイメージング, 広帯域アンテナ, 小型, レンズアンテナ

Characteristics of 77 GHz Band Compact Lens Antenna Used for Short Range Passive Imaging

Miki TAKIMOTO[†], Jun NAKADA^{††}, Kota YAMADA^{†††},

Hiroyasu SATO[†], and Kunio SAWAYA[†]

[†] Graduate School of Engineering, Tohoku University Aoba-ku, Sendai 980 8579, Japan

^{††} Chuo Electronics Corporation Ltd Tokyo 192-8532, Japan

^{†††} Maspro Denkoh Corporation Jyono 80, Asada, Nissin, Aichi 470-0194, Japan

E-mail: takimoto, sahiro@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract A compact lens antenna having a diameter of 100 mm used for 77 GHz band short-range passive imaging is developed and basic characteristics are evaluated experimentally. Antipodal Fermi antenna (APFA) or open-ended waveguide antenna (OWG) is used as receiving antenna. Far field pattern of lens antenna and the received voltage distribution when the transmitting and receiving antennas are both located on the optical axis are measured. It is observed that the received voltage of the lens antenna of APFA is 8.5 dB greater than that of OWG and APFA has prefer for short range imaging.

Key words Passive Imaging, Wide Band Antenna, Compact, Lens Antenna

1. ま え が き

近年、テロ・犯罪等によって安全・安心な社会が脅かされてきており、液体爆発物やプラスチック爆弾等、金属探知機で検知できない不審物を所持する不審者を迅速に検知する手段が望まれている。ミリ波を用いたイメージングは、人が所持している不審物の検知を実現する技術として期待されており、特に、ミリ波パッシブイメージ

ングは人や物から放射されるミリ波帯の熱雑音をパッシブに受信し、非接触・非侵襲で衣服下の不審物を検知可能な技術として実用化が期待されている [1]。筆者らはこれまで、空港等の水際において使用するための 77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置を開発し、実用化を進めてきた [2],[3]。この装置は金属探知機による検査を経た人の正面に配置して人の全身を撮像可能な据え置き型として設計されているが、検査官による 2 次検査や警察

官による不審者の簡易検査（ファーストレスポンス用途）等で使用するためにはハンディー型パッシブイメージング装置の開発が望まれている。

本稿では、既に開発した口径 500 mm の高密度ポリエチレンレンズ [2] の 1/5 スケールモデルを作製し、像面に配置する受信素子として APFA および開口端導波管アンテナ (Open-ended Waveguide Antenna: OWG) を用いた場合のレンズアンテナの基本特性を実験的に検討した結果を述べる。

2. 測定系

2.1 光学系とアンテナ

既に開発した撮像装置 [8] では、レンズ口径 $D = 500$ mm, レンズの厚さ $t = 100$ mm, 撮像距離 3 m, 像面距離 900 mm として設計しており、人の指の幅に相当する空間分解能 20 mm 程度を実現している。このレンズの 1/5 スケールモデルとして、レンズ口径 $D = 100$ mm, 厚さ $t = 20$ mm の非球面誘電体レンズを作製した。レンズの材質は比誘電率が $\epsilon_r = 2.34$ の高密度ポリエチレンである。ハンディー型装置のパラメータとして、1/5 の撮像距離 600 mm, 像面距離 180 mm, 空間分解能 24 mm 程度が得られる。

ミリ波光学系の構成を図 1 に示す。レンズの中心を座標系の原点 O とする。送信アンテナ及び像面上の受信アンテナの先端部の位置をそれぞれ (x', y', z') 及び (x, y, z) とする。レイトレーシング法および実験により得られたレンズの焦点距離はともに $f = 144$ mm であった。また、レンズの曲面は、撮像距離を $x' = -610$ mm, 像面距離を $x = 190$ mm としたときに像面における収差が小さくなるように設計されている [8]。

受信アンテナとして用いた 77 GHz 帯 APFA の構造を図 2 に、アクリルカバー付き APFA の写真を図 3 に示す。APFA のパターンは厚さ $100 \mu\text{m}$ のアルミナ基板上に成膜された金をエッチングして作製されており、アンテナの開口幅は 77 GHz 帯の波長 4 mm としている。また、アンテナの放射パターンは中心周波数 76.5 GHz における E 面と H 面の 10 dB ビーム幅が約 35 度となるように設計されており [2]-[3], APFA 給電部のマイクロストリップ線路 (MSL) から MSL-導波管変換器 [9] を用いて WR-12 導波管に変換している。また、APFA の周囲 20 mm の位置にアクリルカバーを設け、アンテナ基板の破損を防いでいる。このカバーによる APFA の放射パターンへの影響はほとんど無いことを測定により確認した。

送受信アンテナとして用いた OWG の構造と写真を図 4 に示す。OWG は WR-12 の端部を開放としたものであり、管壁に励振される表面電流による放射を減少させ

るため、管壁表面および OWG 背後に電波吸収体を配置した。

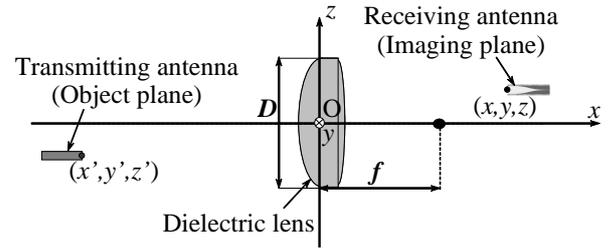


図 1 ミリ波光学系

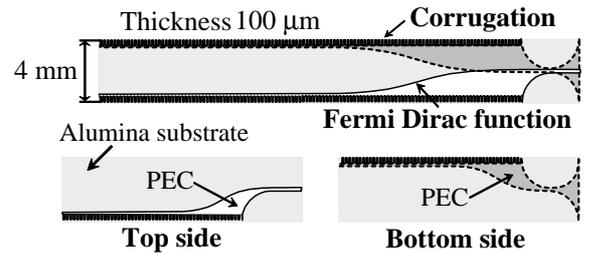


図 2 対せき形フェルミアンテナの構造

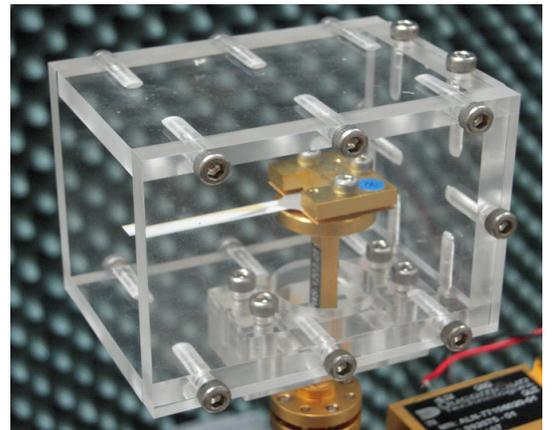


図 3 アクリルカバー付き対せき形フェルミアンテナの写真

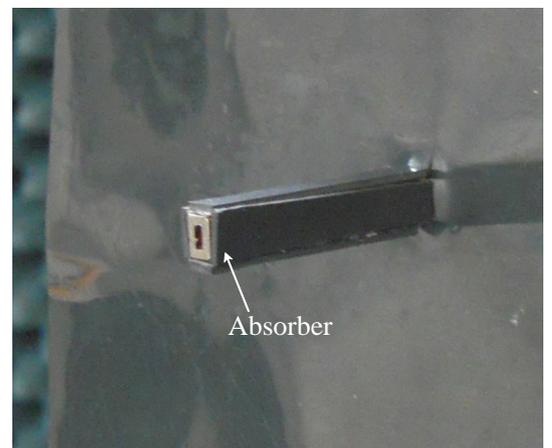


図 4 開口端導波管アンテナの写真

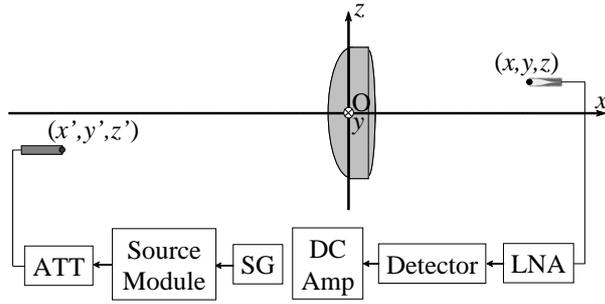


図5 送信アンテナとレンズアンテナの測定系

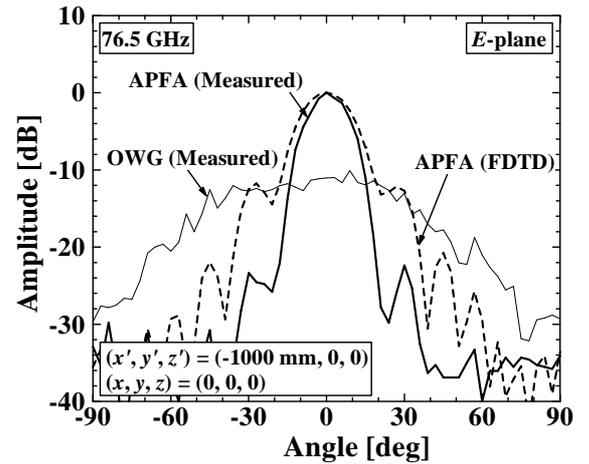
2.2 測定系

図5に送信アンテナとレンズアンテナの測定系を示す。信号発生器から12 GHz帯の信号を出力し、ミリ波ソースモジュールで60~90GHzに周波数を変換し、減衰器を介して送信アンテナから送信する。また、受信アンテナで受信したミリ波を低雑音増幅器で増幅し、SBD検波器で2乗検波された検波電圧をDC増幅器で増幅後、AD変換器でデジタル信号に変換してパソコンで計測する構成である。実験の高精度化を図るために、近距離における測定では送受信系を同じ定盤上に設置し、送受信アンテナともに3軸のメカシリンダーによる制御が可能なシステムを開発した。遠方界パターンの測定では、送信アンテナはz軸方向のみメカシリンダーで制御可能であり、受信アンテナは回転テーブル上の3軸のメカシリンダーによる制御が可能なシステムを構築した。開発した測定システムにより、小型レンズを用いた近距離電界測定および近距離パッシブイメージングにおける再現性のチェックを容易に行うことができる。

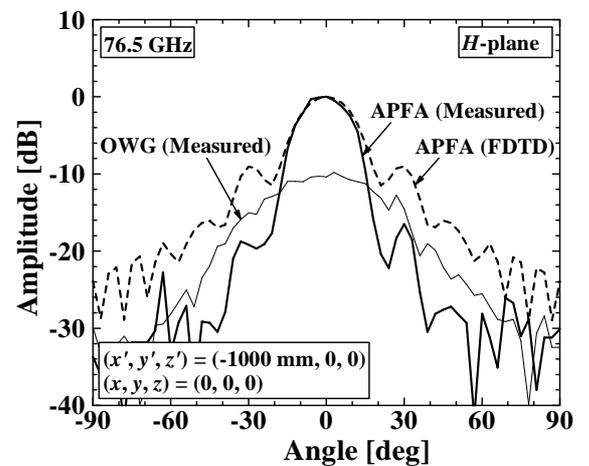
3. 指向性測定

3.1 受信素子の指向性

受信素子として用いたAPFAとOWGの指向性を測定した。送信アンテナとして標準ホーンアンテナを使用し、送受信アンテナのアンテナ先端間の距離は1000 mmとした。2種類の受信アンテナの指向性の測定結果を図6に示す。ただし、APFAの最大値で規格化してある。図6にはAPFAのFDTD法による解析結果も示した。測定によるAPFAの10 dBビーム幅はE面では27.6°、H面では32.0°であった。なお、FDTD法による計算結果ではAPFAの10 dBビーム幅はE面で35.0°、H面では37.5°であった。実験結果と計算結果はメインローブについて概ね一致している。OWGの10 dBビーム幅はE面では107.6°、H面では77.6°であった。以上の結果から、APFAはOWGよりも約10 dB以上利得が高いことに加え、OWGが4節で述べる近距離電界測定においてレンズを一樣に照射可能な送信アンテナとして利用できるこ



(a) E面



(b) H面

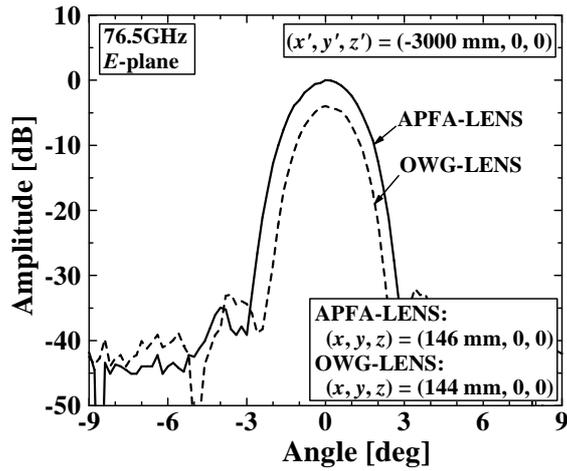
図6 受信素子の指向性

とが確認された。

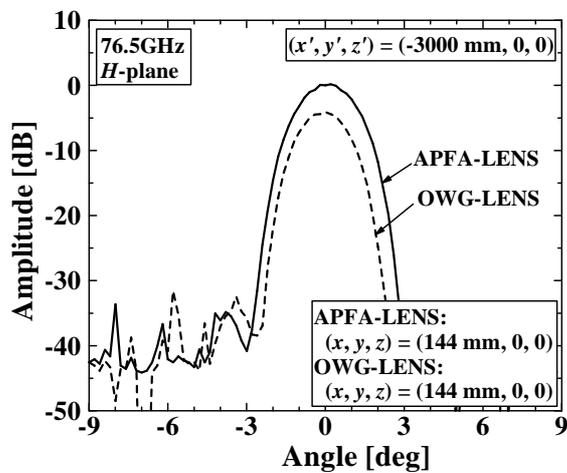
3.2 レンズアンテナの指向性

OWGを受信素子とするレンズアンテナをOWG-LENS、APFAを受信素子とするレンズアンテナをAPFA-LENSとする。レンズアンテナの指向性測定は、図1の位置 $(x, y, z) = (-10 \text{ mm}, 0, 0)$ を回転中心とした xy 面内の回転テーブルを用いて行った。送信ホーンアンテナは $(x', y', z') = (-3010 \text{ mm}, 0, 0)$ に配置した。このときレンズアンテナの受信素子は、回転テーブル上の x 軸メカシリンダーを利用して受信電力が最大となる位置 $x = x_p$ をあらかじめ求め、レンズと受信素子の距離を固定して回転テーブル上に配置した。測定の結果、 $x' = 3010 \text{ mm}$ のときの x_p は、OWG-LENS、APFA-LENS共に $x_p = 144 \text{ mm}$ 付近となり、レイトレーシング法で得られたレンズの焦点距離 $f = 144 \text{ mm}$ とほぼ一致した。

レンズアンテナの指向性の測定結果を図7に示す。ただし、振幅はAPFA-LENSの最大値で規格化した。APFA-LENSはOWG-LENSに対してE面、H面ともに4 dB程度高い利得が得られた。 $x = x_p = 144 \text{ mm}$ における



(a) E 面



(b) H 面

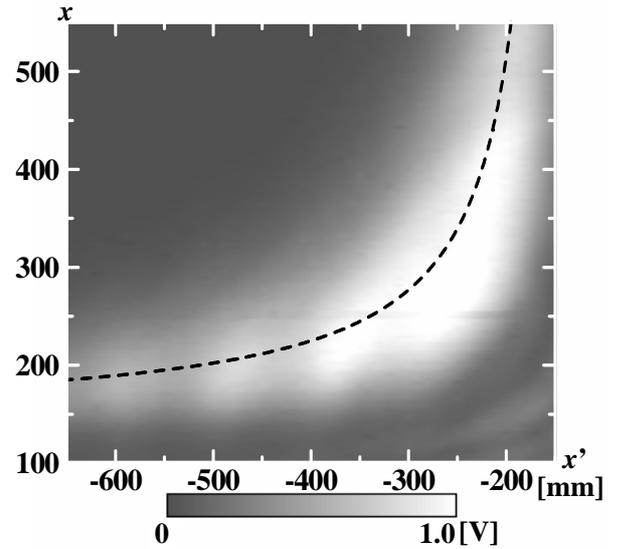
図 7 レンズアンテナの指向性

レンズの見込み角（立体角）は 41 度であり，この値は APFA の 10 dB ビーム幅約 30 度よりも大きい．APFA のビーム幅が 41 度となるアンテナ設計を行うことによりレンズアンテナの利得をさらに向上させることが可能であるが，文献 [8] および本稿で用いた APFA は，レンズの見込み角が 31 度の近距離イメージングのために最適化されており，レンズアンテナの遠方界を最大にする設計としていないことに注意が必要である．

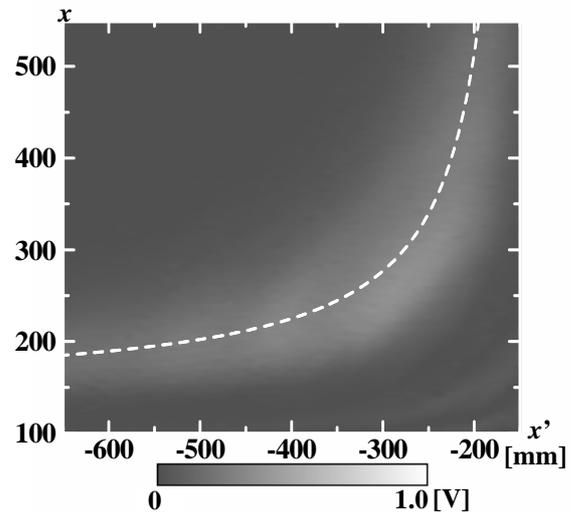
4. 近距離におけるレンズアンテナの特性

送信アンテナとレンズアンテナの受信素子をそれぞれ光軸上に配置し，受信電圧分布を測定した．送信アンテナは OWG である．APFA-LENS，OWG-LENS の場合について， x' と x を変化させたときの受信電圧を図 8 に示す．図の濃淡は，白いほど受信電圧が大きく，黒いほど小さいことを示しており，APFA-LENS は OWG-LENS よりも受信電圧が大きいことが明らかとなった．図中の点線はレンズの公式

$$\frac{1}{x'} + \frac{1}{x} = \frac{1}{f} \quad (1)$$



(a) 対せき形フェルミアンテナを受信素子とした場合



(b) 開口端導波管アンテナを受信素子とした場合

図 8 撮像距離と像面距離を変化させたときの光軸上の受信電圧分布

を用いて算出した x' に対する x の値を示している．受信電圧が最大となる位置 x はレンズの公式を満たす x の値と概ね一致しているが，多少ずれる結果が得られた．APFA-LENS，OWG-LENS 共に送信 OWG がレンズに近づくほど受信電圧が大きくなり，APFA-LENS の場合は $x' = -260$ mm， $x = 270$ mm のときに，また OWG-LENS の場合は $x' = -280$ mm， $x = 262$ mm のときに最大の受信電圧が得られた．これらの結果から，レンズ倍率が等倍程度となる位置に送受信アンテナを配置することにより最大受信電圧が得られるものと推測される．

図 8 において，送信 OWG の位置を $x' = -610$ mm に固定し，受信素子の位置 x を変化させた場合の受信電圧分布を図 9 に示す．受信電圧が最大となる位置 x_p は，APFA-LENS の場合は $x = 178$ mm，OWG-LENS の場

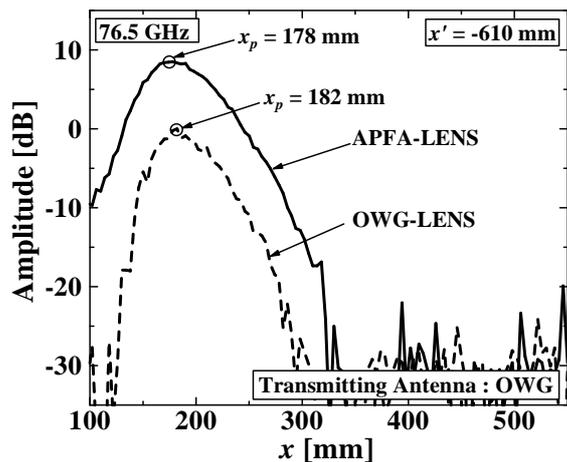


図9 受信素子の位置を変化させた場合の光軸上の受信電圧分布

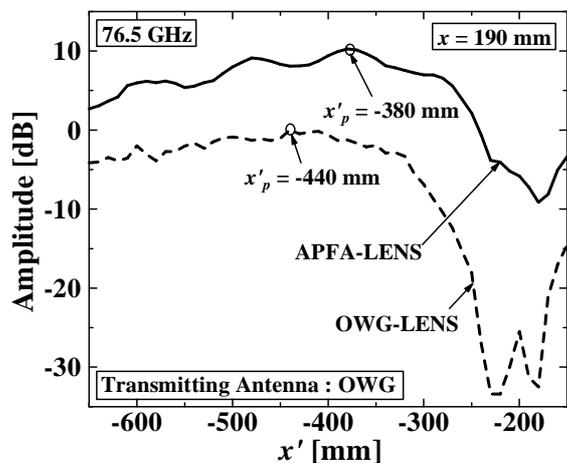


図10 送信アンテナの位置を変化させた場合の光軸上の受信電圧分布

合は $x = 182 \text{ mm}$ が得られており、これらの値はレイトレーシング法で得られた結像位置 $x = 190 \text{ mm}$ より小さい。これらの位置において、APFA-LENS は $x' = -260 \text{ mm}$, $x = 270 \text{ mm}$ における受信電圧よりも 6.06 dB , OWG-LENS は $x' = -280 \text{ mm}$, $x = 262 \text{ mm}$ における受信電圧よりも 5.54 dB 低い値となった。また、振幅が 3 dB 減少する幅として焦点深度 W_x を定義した場合、APFA-LENS の場合は $W_x = 65 \text{ mm}$, OWG-LENS の場合は $W_x = 53 \text{ mm}$ が得られ、APFA の方が焦点深度が深い結果が得られた。さらに、APFA-LENS の受信電圧は OWG-LENS の場合よりも 8.5 dB 大きく、APFA-LENS の方が受信感度において有利であることが確認された。

図8において、受信素子の位置を $x = 190 \text{ mm}$ に固定し、送信 OWG の位置 x' を変化させた場合の受信電圧分布を図10に示す。APFA-LENS では $x' \leq -380 \text{ mm}$, OWG-LENS では $x' \leq -440 \text{ mm}$ の範囲内で撮像距離 $|x'|$ が小さいほど受信電圧が大きくなり、APFA-LENS では $x' = -590 \text{ mm}$, $x' = -480 \text{ mm}$, $x' = -380 \text{ mm}$ の3箇所に極大値が観測された。この結果から、APFA-LENS を

用いて実際にイメージングを行う場合、撮像距離は $x' = -610 \text{ mm}$ よりも受信感度が高くなる位置が存在する。ただし、撮像距離 $|x'|$ が小さいほど視野は狭くなるため、必要な視野と所望の分解能を得るためのイメージング素子の数の選定が必要である。このレンズアンテナをイメージングに応用した場合の x に対する分解能については今後検討する必要がある。

5. まとめ

本報告では、APFA および OWG を受信素子として用いた場合の 77 GHz 帯小型レンズアンテナの特性を実験により検証した。その結果、遠方イメージングに比べて像面距離が長くなる近距離イメージングにおいては、ビーム幅の狭い指向性アンテナが感度において有利であることが確認された。また、撮像距離が近くなるほど受信電圧が増加することが分かった。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省安全・安心科学技術プロジェクト(研究代表者佐藤弘康)の助成を得て行われた。

文 献

- [1] 佐藤 弘康, 澤谷 邦男, 水野 皓司, "ミリ波パッシブイメージング技術(セキュリティ分野への応用を主に)", 計測と制御, 第42巻, 第1号, pp. 748-753, 2009.
- [2] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野皓司, 植村順, 武田政宗, 高橋順一, 山田康太, 森近慶一, 平井晴之, 新倉広高, 松崎智彦, 中田淳, "77GHz 帯ミリ波パッシブ撮像装置の開発", 2009 年電子情報通信学会総合大会, CS-4-1, 2009.
- [3] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野皓司, 植村順, 武田政宗, 高橋順一, 山田康太, 森近慶一, 平井晴之, 新倉広高, 松崎智彦, 中田淳, "77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置", 2010 年電子情報通信学会総合大会, B-1-150, 2010 (発表予定).
- [4] H. Sato, K. Sawaya, N. Arai, Y. Wagatsuma and K. Mizuno, "FDTD Analysis of Fermi Tapered Slot Antenna With Corrugation Structure", China-Japan Joint Meeting on Microwaves, pp.137-140, (2002).
- [5] 佐藤 弘康, 新井 直人, 我妻 嘉彦, 澤谷 邦男, 水野 皓司, "コルゲート構造付ミリ波フェルミアンテナの設計", 信学論 (B), vol.J86-B, no.9, pp.1851-1859, Sep. 2003.
- [6] H. Sato, K. Sawaya, Y. Wagatsuma and K. Mizuno, "Design of Narrow-width Fermi Antenna with Circular Radiation Pattern," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. 4, pp. 4312-4315, Monterey, USA, 2004.
- [7] 佐藤 弘康, 澤谷 邦男, 我妻 嘉彦, 水野 皓司, "コルゲート構造付フェルミアンテナの広帯域 FDTD 解析", 信学論 (B), vol.J88-B, no.9, pp.1682-1692, Sep. 2005.
- [8] 井上大聡, 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野 皓司, "ミリ波イメージング用小形誘電体レンズアンテナの設計", 電子情報通信学会技術研究報告, AP2008-131, pp.115-120, 2008.
- [9] 山田康太, 高橋順一, 武田政宗, 植村順, 水野皓司, 澤谷邦男, 佐藤弘康, "77GHz 帯対称形フェルミアンテナの放射パターン測定", 2009 年電子情報通信学会総合大会, B-1-90, 2009.